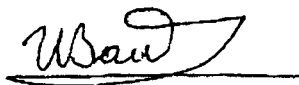


0- 803313

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВ ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ
НА ОСНОВЕ ДВУХЭТАПНОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ**

**05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка
информации (в химической технологии)**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2013

Работа выполнена на кафедре «Системотехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель:

Лаптева Татьяна Владимировна
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Емалетдинова Лилия Юноровна
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ», профессор кафедры прикладной математики и информатики

Мустафина Светлана Анатольевна

доктор физико-математических наук, профессор, Стерлитамакский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Башкирский государственный университет», заведующий кафедрой математического моделирования, декан физико-математического факультета

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет»

Защита состоится «20» декабря 2013 года в 14.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.080.13 при ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по адресу: г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, ауд. А-330.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68, КНИТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.080.13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технологического университета.

Автореферат разослан «18» ноября 2013 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.080
доктор технических наук, профессо

Клинов
Александр
Игнатович
НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



853549

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На сегодняшний день одними из приоритетных направлений развития науки, технологии и техники РФ являются «Энергетика и энергосбережение» и «Рациональное природопользование» (Пр-843 от 21.05.2006). В связи с этим поиск оптимальных энерго- и ресурсосберегающих решений при проектировании технических систем химической, нефте-химической, нефтеперерабатывающей, а также других смежных отраслей экономики является важной задачей. Разработка подходов к оптимизации технических систем, в том числе химико-технологических систем (ХТС), является одним из передовых направлений исследований в современной науке. Решение этих задач невозможно без использования методов системного анализа, моделирования и оптимизации. При решении задач проектирования оптимальных химико-технологических систем необходимо учитывать, что химико-технологические системы, на этапе их проектирования, характеризуются неполными физико-химическими, технологическими, экономическими и прочими сведениями. В этих случаях для части параметров, на основе которых проектируется система, неизвестны их точные значения, но известны диапазоны их изменения. В результате возникает задача проектирования оптимальных ХТС с учетом неопределенности исходной информации.

Поскольку реальные объекты всегда характеризуются неопределенностью по ряду их параметров, то решение задач с учетом факторов неопределенности является актуальным направлением исследований.

В настоящее время при проектировании работоспособных ХТС для учета изменения условий функционирования вычисленные в номинальной оптимизации значения конструктивных параметров домножают на некоторые коэффициенты запаса, выбор которых основан на опыте и интуиции специалистов. Эмпирическое задание коэффициентов запаса может привести к значительному увеличению размеров аппаратов, перерасходу сырья и энергоресурсов и, следовательно, к существенному увеличению стоимости строительства и эксплуатации технических систем. С другой стороны, эмпирический подход может привести к проектированию конструкции, которая не будет гарантировать выполнение проектных требований в процессе эксплуатации ХТС, что, в свою очередь, может привести к снижению качества продукции, авариям или преждевременному выходу ХТС из строя.

Задачами системных исследований и проектирования ХТС с учетом неопределенности за рубежом занимаются Grossmann I.E., Biegler L.T., Halemane K.P., Pistikopoulos E.N., Ierapetritou M.G., Wendt M., в России – Островский Г.М., Волин Ю.М., Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Елизаров В.И., Зитдинов Н.Н., Мешалкин В.П., Холоднов В.А.

При этом решение поставленной проблемы нельзя считать завершенным. Разработанные в настоящее время методы решения задач проектирования оптимальных ХТС с учетом неопределенности требуют значительных вычислительных ресурсов или не обладают универсальностью в требуемых условиях применения.

Отсюда следует актуальность разработки научно обоснованных быстродействующих алгоритмов решения задачи проектирования оптимальных ХТС с учетом неопределенности исходной информации, а также их программная реализация.

Цель диссертационной работы:

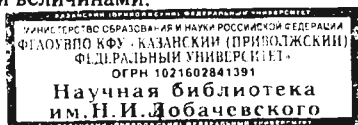
— разработка эффективных подходов, алгоритмов и их программная реализация для проектирования оптимальных ХТС на основе двухэтапных задач оптимизации с вероятностными ограничениями при статистически взаимно независимых и зависимых неопределенных параметрах.

В соответствии с поставленной целью исследования выделены задачи:

- разработать подходы и алгоритмы, которые не требуют вычисления многомерных интегралов на каждой итерации решения двухэтапной задачи оптимизации с вероятностными ограничениями при статистически взаимно независимых и зависимых неопределенных параметрах;
- используя разработанные алгоритмы, спроектировать программный комплекс проектирования ХТС на основе двухэтапных задач оптимизации при статистически взаимно независимых и зависимых неопределенных параметрах и наличии вероятностных ограничений;
- проверить работоспособность разработанного алгоритма с помощью созданного программного комплекса на решении задач проектирования оптимальных ХТС с учетом неопределенности в исходной информации.

Научная новизна:

- Предложены новые эффективные подходы и алгоритмы, позволяющие получать верхнюю оценку критерия двухэтапной задачи оптимизации с вероятностными ограничениями при статистически взаимно независимых и зависимых неопределенных параметрах в виде задачи детерминированной полубесконечной оптимизации.
- Подход решения задачи при статистически взаимно независимых неопределенных параметрах основан на процедуре аппроксимации зависимости управлений от неопределенных параметров в виде кусочно-линейной функции, а также на процедурах аппроксимации областей выполнения ограничений и математического ожидания в критерии задачи оптимизации, что позволяет избежать вычисления многомерных интегралов на каждой итерации решения.
- Разработана эффективная процедура уточнения верхней оценки критерия двухэтапной задачи оптимизации, основанная на согласовании уточнения аппроксимаций зависимости управлений от неопределенных параметров, областей выполнения ограничений и математического ожидания критерия задачи.
- На основе предложенных подходов разработаны подходы решения задачи при статистически взаимно зависимых неопределенных параметрах, основанные на распределении χ^2 и замене зависимых неопределенных параметров независимыми случайными величинами.



Практическая значимость:

- Используя разработанные алгоритмы создан программный комплекс для проектирования оптимальных ХТС на основе двухэтапных задач оптимизации с вероятностными ограничениями. Комплекс может использоваться для решения задач как в химической промышленности, так и в других отраслях.
- С помощью созданного программного комплекса была решена задача проектирования оптимальной подсистемы реакторного узла процесса изомеризации *n*-пентана с учетом неопределенности в исходной информации.
- Разработанный программный комплекс используется в учебном процессе кафедры системотехники КНИТУ и передан для использования в ООО "Инженерно-внедренческий центр "Инжехим" (г. Казань) и ООО "Оптимальные нефтехимические технологии" (г. Казань).

Апробация работы. Результаты исследования были апробированы на международных конференциях и симпозиумах: 23-я Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-23 (г. Саратов, 2010 г.); 24-я Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-24 (г. Пенза, 2011 г.); 25-я Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-25 (г. Волгоград, 2012 г.); I Всероссийская Интернет-конференция "Грани науки 2012", г. Казань; 26-я Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях» ММТТ-26 (г. Нижний Новгород, 2013 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 14 опубликованных печатных трудах, в том числе в 8 статьях в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 176 страницах основного текста, состоящего из введения, 4 глав, содержащих основные результаты работы, выводов, приложений на 28 страницах, списка использованной литературы из 243 наименований. Работа содержит 8 рисунков и 38 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность доктору технических наук, профессору Зиятдинову Н.Н. и доктору технических наук, профессору Островскому Г.М. за научные консультации в процессе выполнения данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи проведенного исследования.

В первой главе проводится классификация неопределенных параметров и источников неопределенности, приведены постановки задач проектиро-

вания оптимальных ХТС с учетом неопределенности в исходной информации с разными видами целевых функций и ограничений.

Показано, что в зависимости от учета на этапе проектирования возможности подстройки управлений под изменяющиеся условия эксплуатации ХТС задача проектирования оптимальных ХТС с учетом неопределенности принимает вид одноэтапной задачи оптимизации (ОЭЗО) или двухэтапной задачи оптимизации (ДЭЗО). ОЭЗО используется, когда ХТС проектируется без учета возможности изменения управления на этапе функционирования, а двухэтапная постановка позволяет проектировать ХТС с учетом возможности подстройки управлений под изменяющиеся значения неопределенных параметров на этапе функционирования ХТС.

ДЭЗО с жесткими ограничениями имеет вид

$$\min_{d, z(\theta)} f(d, z(\theta), \theta) \quad (1)$$

$$g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0, \quad \forall \theta \in T, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где ограничения (2) представляют собой математическую формулировку проектных требований, f – оценка эффективности функционирования ХТС за рассматриваемый период, $g_j, j = \overline{1, m}$, – проектные требования, d – вектор конструктивных переменных, (например, объем реактора или площадь поверхности теплообменника), $z(\theta)$ – n_z -вектор-функция зависимости технологических управляющих переменных от неопределенных параметров переменных (например, зависимость температуры, давления, расхода потока от неопределенных параметров), θ – n_θ -вектор неопределенных параметров, $\theta \in T$, где T – область неопределенности, которая формируется из диапазонов изменения неопределенных параметров θ . Рассматривается случай, когда область неопределенности имеет вид многомерного прямоугольника.

Рассмотрены подходы и методы решения задач оптимизации с учетом неопределенности. Основная проблема решения таких задач – это высокие вычислительные затраты на их решение, связанные с их стохастической природой.

Были рассмотрены подходы к решению ОЭЗО и ДЭЗО, использующие на каждом шаге процедуры оптимизации численных методов вычисления многомерных интегралов, а также подходы, сводящие вероятностные ограничения к детерминированному виду. Показано, что первые подходы требуют большого времени для получения решения задач, вторые же не обладают универсальностью в отношении вида функций ограничений. В этой главе рассмотрен подход к решению ОЭЗО с вероятностными ограничениями и целевой функцией в виде математического ожидания критерия эффективности функционирования ХТС, основанный на процедурах аппроксимации критерия и сведении вероятностных ограничений к детерминированным. Показано, что задачи оптимизации с учетом неопределенности являются или могут быть сведены к задачам полубесконечного программирования. Такие задачи предлагается решать с помощью метода внешней аппроксимации. Отмечено, что существенным недостатком ОЭЗО является невозможность учета зависимости управления от неоп-

ределенных параметров. Отсюда вытекает актуальность разработки эффективных подходов решения ДЭЗО с вероятностными ограничениями.

Вторая глава посвящена разработке подходов и алгоритмов проектирования ХТС на основе ДЭЗО с вероятностными ограничениями и целевой функцией в виде математического ожидания критерия эффективности функционирования ХТС для случая взаимной статистической независимости и нормального распределения значений неопределенных параметров. Было показано, что рассматриваемая задача имеет вид:

$$\min_{d, z(\theta)} E_{\theta}[f(d, z(\theta), \theta); T] \quad (3)$$

где $\Pr\{g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0\} \geq \alpha_j$, $j = \overline{1, m}$, $\forall \theta \in T$,
 $\Pr\{g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0\}$ – вероятность выполнения ограничений
 $g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0$,

$$\Pr\{g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0\} = \int_{\Omega} \rho(\theta) d\theta, \quad \text{где } \Omega = \{\theta : g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0\};$$

$$E_{\theta}[f(d, z(\theta), \theta); T] = \int_T f(d, z(\theta), \theta) \rho(\theta) d\theta,$$

$\rho(\theta)$ – функция плотности распределения.

В работе было показано, что задача (3) может быть сведена к задаче

$$\min_{d, z(\theta), T_{\alpha_j}} E_{\theta}[f(d, z(\theta), \theta); T] \quad (4)$$

$$\max_{\theta \in T_{\alpha_j}} g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0, \quad (5) \quad \Pr\{\theta \in T_{\alpha_j}\} \geq \alpha_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (6)$$

в которой осуществляется поиск оптимальных вида, размера и местоположения областей T_{α_j} . Чтобы избавиться от вероятностных ограничений (6), ограничим вид T_{α_j} многомерными прямоугольниками и, для уточнения аппроксимации областей выполнения вероятностных ограничений, будем разбивать области T_{α_j} , в результате чего в число поисковых переменных задачи вместо областей T_{α_j} будут включены границы подобластей $\theta_i^{L, j, l}; \theta_i^{U, j, l}$:

$$\min_{d, z(\theta), \theta_i^{L, j, l}, \theta_i^{U, j, l}} E_{\theta}[f(d, z(\theta), \theta); T] \quad (7)$$

$$\max_{\theta \in T_{\alpha_j}^l} g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0, \quad (8) \quad \sum_i^{N_j^{(k)}} \prod_i^{n_{\theta}} [\Phi(\bar{\theta}_i^{U, j, l}) - \Phi(\bar{\theta}_i^{L, j, l})] \geq \alpha_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (9)$$

$$T_{\alpha_j}^l = \{\theta_i : \theta_i^{L, j, l} \leq \theta_i \leq \theta_i^{U, j, l}, i = \overline{1, n_{\theta}}\}, \quad T_{\alpha_j} = \bigcup_l T_{\alpha_j}^l, \quad \bigcap_l T_{\alpha_j}^l = \emptyset, \quad T_{\alpha_j} \subset T,$$

где $N_j^{(k)}$ – количество подобластей $T_{\alpha_j}^l$ на итерации k процедуры дробления, Φ – функция стандартного нормального распределения, $\bar{\theta}_i^{L, j, l} = (\theta_i^{L, j, l} - E[\theta_i]) \cdot \sigma_i^{-1}$, $\bar{\theta}_i^{U, j, l} = (\theta_i^{U, j, l} - E[\theta_i]) \cdot \sigma_i^{-1}$. Задача (7) не содержит вероятностных ограничений и дает верхнюю оценку решения задачи (4).

Поскольку ДЭЗО в отличие от ОЭЗО учитывает возможность подстройки управлений под изменение значений неопределенных параметров, то для решения задачи (7) будем проводить поиск оптимальной функции зависимости $z(\theta)$ управлений от неопределенных параметров. В работе рассмот-

рента линейная зависимость $\bar{z}_j(\theta) = b^0 + \sum_{i=1}^{n_\theta} b^i \theta_i$, $j = \overline{1, n_z}$, при этом вид этой зависимости, очевидно, может быть любым. Будем проводить поиск оптимальных значений коэффициентов b^i , $i = \overline{0, n_\theta}$. Проведем замену

$$F(d, b, \theta) \equiv f(d, b^0 + \sum_{i=1}^{n_\theta} b^i \theta_i, \theta), \quad G_j(d, b, \theta) \equiv g_j(d, b^0 + \sum_{i=1}^{n_\theta} b^i \theta_i, \theta), \quad j = \overline{1, m}.$$

Поскольку вид зависимостей $z(\theta)$ был ограничен линейной функцией, получаем вид задачи определения верхней оценки задачи (7)

$$\min_{d, b, \theta^{L, j, l}, \theta^{U, j, l}} E_\theta[F(d, b, \theta); T] \quad (10)$$

$$\max_{\theta \in T_{a_j}} G_j(d, b, \theta) \leq 0, \quad \sum_{i=1}^{N_j^{(k)}} \prod_i^{n_\theta} [\Phi(\bar{\theta}_i^{U, j, l}) - \Phi(\bar{\theta}_i^{L, j, l})] \geq \alpha_j, \quad j = \overline{1, m},$$

$$T_{a_j}^l = \{\theta_i : \theta_i^{L, j, l} \leq \theta_i \leq \theta_i^{U, j, l}, i = \overline{1, n_\theta}\}, \quad T_{a_j} = \bigcup_l T_{a_j}^l, \quad \bigcap_l T_{a_j}^l = \emptyset, \quad T_{a_j} \subset T.$$

Задача (10) является задачей стохастической оптимизации. Для уменьшения затрат на вычисление многомерного интеграла в критерии задачи (10) аппроксимируем функцию $f(d, z(\theta), \theta)$ разложением в ряд Тэйлора в точке $\theta^q \in T$, и для уточнения аппроксимации будем разбивать область T на подобласти T^q , $q = \overline{1, M^{(k)}}$. Будем раскладывать $f(d, z(\theta), \theta)$ в центральных точках T^q . Отбрасывая из разложения члены второго или первого порядка малости, получим аппроксимацию критерия в (10) кусочно-линейной функцией

$$\bar{E}_{ap}[F(d, b, \theta); T] = \sum_{q=1}^{M^{(k)}} [a^q F(d, b^q, \theta^q) + \sum_i \frac{\partial F(d, b^q, \theta^q)}{\partial \theta_i} (E[\theta_i; T^q] - a^q \theta_i^q)]$$

или кусочно-постоянной функцией: $\bar{E}_{ap}[F(d, b, \theta); T] = \sum_{q=1}^{M^{(k)}} a^q F(d, b^q, \theta^q)$,

где $a^q = \prod_i a_i^q$, $a_i^q = \int_{\theta_i^{L, q}}^{\theta_i^{U, q}} \rho(\theta_i) d\theta_i$, $E[\theta_i; T^q] = \int_{T^q} \theta_i \rho(\theta) d\theta$.

Итерационная процедура уточнения аппроксимации критерия будет также уточнять аппроксимации зависимостей $\bar{z}_j(\theta)$ в областях T^q кусочно-линейными функциями вида $\bar{z}_j^q(\theta) = b^{0, q} + \sum_{i=1}^{n_\theta} b^{i, q} \theta_i$, $j = \overline{1, n_z}$, $q = \overline{1, M^{(k)}}$.

Тогда задача, решаемая на итерации k процедуры уточнения верхней оценки ДЭЗО (3) будет выглядеть следующим образом

$$\min_{d, b^q, \theta^{L, j, l}, \theta^{U, j, l}} E_{ap}[F(d, b, \theta); T] \quad (11)$$

$$\max_{\theta \in T_{a_j}^l} G_j(d, b, \theta) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{N_j^{(k)}} \prod_i^{n_\theta} [\Phi(\bar{\theta}_i^{U, j, l}) - \Phi(\bar{\theta}_i^{L, j, l})] \geq \alpha_j, \quad i = \overline{1, n_\theta}, \quad j = \overline{1, m},$$

$$T = \{\theta_i : \theta_i^L \leq \theta_i \leq \theta_i^U, i = \overline{1, n_\theta}\},$$

$$T^q = \{\theta_i : \theta_i^{L, q} \leq \theta_i \leq \theta_i^{U, q}, i = \overline{1, n_\theta}\}, \quad q = \overline{1, M^{(k)}},$$

$$T_{a_j}^l = \{\theta_i : \theta_i^{L, j, l} \leq \theta_i \leq \theta_i^{U, j, l}, i = \overline{1, n_\theta}\}, \quad l = \overline{1, N_j^{(k)}}.$$

Задача (11) является задачей детерминированной полубесконечной оптимизации. Для ее решения предложен алгоритм, основанный на модификации метода внешней аппроксимации¹ и процедуре дробления области неопределенности. В главе показана сложность синхронизации разных видов дробления (для уточнения аппроксимаций критерия задачи (10), областей T_{α_j} , зависимостей $z_j(\theta)$), заключающаяся в том, что в процессе поиска местонахождения и размеров областей $T_{\alpha_j}^l$, функции $G_j(d, b, \theta^{j,l})$ могут стать недифференцируемыми вследствие скачкообразного изменения значений коэффициентов b^l , $l = \overline{0, n_\theta}$ в пределах областей $T_{\alpha_j}^l$, возникающего при дроблении областей T^q . Автором предложен способ синхронизации дроблений, решающий указанную проблему и уменьшающий число поисковых переменных за счет деления ограничений (12) на функцию ψ , зависящую от объемов $V_{\alpha_j}^{l,q}$ области $T_{\alpha_j}^{l,q} = T_{\alpha_j}^l \cap T^q$ и V области T . Ограничения (12) примут вид

$$\max_{\theta \in T_{\alpha_j}^l} G_j(d, b, \theta^{j,l}) / \psi(V_{\alpha_j}^{l,q}, V) \leq 0. \quad (13)$$

Если объем $V_{\alpha_j}^{l,q}$ близок к нулю, то ограничения (13) обратятся в ноль за счет резкого увеличения значения функции ψ , вид которой приведен в главе.

Обобщенный вид Алгоритма решения задачи (11) примет вид

Шаг 1. Задать значения $k=1$; множества областей для аппроксимации критерия (11) и зависимости управлений от неопределенных параметров — T^q , $q = \overline{1, M^{(k)}}$, $M^{(k)}=1$; множества областей выполнения ограничений $T_{\alpha_j}^l$ и точек $S_{jj}^{(0)}$, $l = \overline{1, N_j^{(k)}}$, $j = \overline{1, m}$, $N_j^{(k)} = 1$; начальные значения $d^{(0)}$, $b_i^{l,q(0)}$, $i = \overline{0, n_\theta}$, $j = \overline{0, n_z}$, $q = \overline{1, M^{(k)}}$, малое $\varepsilon > 0$, малое $f^{(0)}$.

Шаг 2. Решить задачу нелинейного программирования

$$F^{(k)} = \min_{d, b^q, \theta_i^{L,j,l}, \theta_i^{U,j,l}} E_{ap} [F(d, b, \theta), T]$$

$$G_j(d, b, \theta^{j,l}) / \psi(V_{\alpha_j}^{l,q} \cdot V^{-1}) \leq 0, \theta^{j,l} \in S_{jj}^{(k)}, \sum_{l=1}^{N_j^{(k)}} \prod_{i=1}^n [\Phi(\bar{\theta}_i^{U,j,l}) - \Phi(\bar{\theta}_i^{L,j,l})] \geq \alpha_j,$$

$$\theta_i^L \leq \theta_i^{L,j,l}, \theta_i^{U,j,l} \leq \theta_i^U, \theta_i^{L,j,l} \leq \theta_i^{U,j,l}, i = \overline{0, n_\theta}, j = \overline{0, n_z}, q = \overline{1, M^{(k)}}, l = \overline{1, N_j^{(k)}}.$$

Пусть $(F, d, b^q, \theta^{L,j,l}, \theta^{U,j,l})^{(k)}$ — решение.

Шаг 3. Добавление к множествам $S_{jj}^{(k)}$ точек $\theta \in T_{\alpha_j}^l$, где ограничения (12) нарушаются. Если точки были добавлены, то перейти на шаг 2.

Шаг 4. Проверить условие окончания алгоритма. Если оно выполнено, то решение найдено. Остановка алгоритма.

¹ Левитин Е.С. Методы ограниченной минимизации / Е.С. Левитин, Б.Т. Полак // Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 1966. - N 5. - С. 787-823.

Шаг 5. Выбрать область T^q для разбиения, согласно правилу, описанному в главе, и разбить ее. Добавить коэффициенты $b_i^{j,q,(0)}$ для новых областей в число поисковых переменных задачи.

Шаг 6. Выбрать области $T_{a_i}^l$ для разбиения согласно правилу, описанному в главе, и разбить их. Добавить границы новых областей в число поисковых переменных задачи.

Шаг 7. Увеличить счетчик итераций $k=k+1$.

Разработанный алгоритм был апробирован на решении задач проектирования ХТС реактор-теплообменник² и системы реакторов³.

ХТС реактор-теплообменник (РТ) (см. рисунок 1). В реакторе идеально-го смешения объемом V протекает экзотермическая реакция первого порядка вида $A \rightarrow B$. Теплообменник служит для поддержания температуры в реакторе.

Конструктивными параметрами были выбраны объем реактора V , м³, и площадь теплообмена A_t , м². Управляющими – температура в реакторе $T_1 = 311 \div 389$ К, и выходная температура потока охлаждающей воды $T_{w_2} = 301 \div 355$ К. Переменные состояния: C_{A1} – концентрация реагента A в продукте, кмоль/м³, T_2 – температура, К, F_1 и F_w – расход рециркуляционного потока и расход потока охлаждающей воды, м³/ч, соответственно. Неопределенные параметры: $\theta = [F_0, T_0, T_{w1}, k_R, U]$, – расход входного потока в реактор, м³/ч, его температура, К, входная температура потока охлаждающей воды, К, скорость реакции, м³/(кмоль·ч), и коэффициент теплопередачи, кДж/(м²·ч·К), соответственно. Область неопределенности задается в виде $T = \{\theta^N - \gamma \delta \theta^N \leq \theta \leq \theta^N + \gamma \delta \theta^N\}$, значения номинальных значений неопределенных параметров θ^N и отклонений δ приведены в таблице 1. Размер области T регулируется с помощью параметра γ .

Вид задачи проектирования оптимальной ХТС РТ на основе ДЭЗО:

$$\min_{V, A, z(\theta)} E_\theta[691,2 \cdot V^{0,7} + 873 \cdot A_t^{0,6} + 1,76 \cdot F_w(d, z(\theta), \theta) + 7056 \cdot F_1(d, z(\theta), \theta)] \quad (14)$$

$$\Pr\{0,9 - \text{conv}(d, z(\theta), \theta) \leq 0\} \geq \alpha_1, \quad \Pr\{T_2(d, z(\theta), \theta) - T_1(\theta) \leq 0\} \geq \alpha_2, \quad (15)$$

$$\Pr\{\theta_3 - T_{w2}(\theta) \leq 0\} \geq \alpha_3, \quad \Pr\{\theta_3 - T_2(d, z(\theta), \theta) + 11,1 \leq 0\} \geq \alpha_4,$$

$$\Pr\{311 - T_2(d, z(\theta), \theta) \leq 0\} \geq \alpha_5, \quad \Pr\{T_2(d, z(\theta), \theta) - 389 \leq 0\} \geq \alpha_6,$$

$$T_{w2}(\theta) - T_1(\theta) + 11,1 \leq 0, \quad \forall \theta \in T, \quad 311 - T_1(\theta) \leq 0, \quad \forall \theta \in T, \quad (16)$$

$T_1(\theta) - 389 \leq 0, \quad \forall \theta \in T, \quad 301 - T_{w2}(\theta) \leq 0, \quad \forall \theta \in T, \quad T_{w2}(\theta) - 355 \leq 0, \quad \forall \theta \in T$, где $z(\theta) = \{T_1(\theta), T_{w2}(\theta)\}$. Проектные требования системы представлены ограничениями (15) (вероятностные) и (16) (жесткие).

² Halemane K.P. Optimal Process Design under Uncertainty / K.P. Halemane, I.E. Grossmann // AIChE J. - 1983. - vol. 29. - P. 425-433

³ Wendt M. Nonlinear Chance-constrained Process Optimization under uncertainty / M. Wendt, P. Li, G. Wozny // Ind. Eng. Chem. Res. - 2002. - № 41. - P. 3621-3629

В таблице 2 представлены результаты проведенного вычислительного эксперимента проектирования оптимальной ХТС РТ. Слева (ДЭЗО) приведены результаты применения подхода, предлагаемого в работе, справа (ОЭЗО) приведены результаты решения задачи на основе одноэтапной постановки.

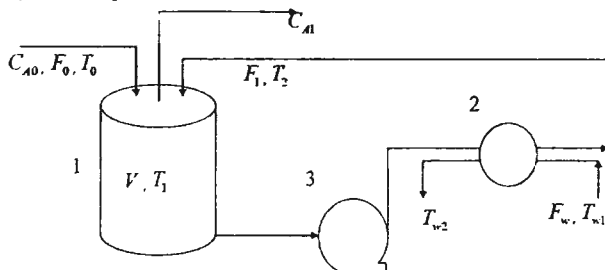


Рисунок 1 – Технологическая схема ХТС реактор-теплообменник

Таблица 1 – Характеристика области неопределенности

Параметр	F_0	T_0	T_{w1}	k_R	U
θ^N	45,36	393	300	9,81	1635,34
δ	0,1	0,02	0,03	0,1	0,1

Таблица 2 – Результаты решения задачи проектирования ХТС РТ

γ	α	ДЭЗО				ОЭЗО			
		Критерий	V	A_t	t , сек	Критерий	V	A_t	t , сек
1	0,5	9865,1	5,57	7,39	62	9893,7	5,63	7,438	30
	0,75	9943,6	5,73	7,42	74	9972,4	5,79	7,48	11
	0,95	10114	6,005	7,61	72	10132	6,04	7,62	32
	0,99	10191	6,21	7,56	71	10202	6,24	7,56	25
1,25	0,5	9936,9	5,596	7,526	82	9970	5,66	7,54	15
	0,75	10032	5,79	7,57	75	10069	5,871	7,59	187
	0,95	10222	6,14	7,81	80	10242	6,19	7,82	32
	0,99	10313	6,41	7,71	73	10327	6,44	7,71	30
1,5	0,5	9990,8	5,62	7,66	58	10038	5,7	7,68	303
	0,75	10146	5,86	7,96	59	10190	5,95	7,98	166
	0,95	10342	6,28	8,05	64	10370	6,35	8,07	74
	0,99	10444	6,61	7,88	63	10462	6,65	7,92	96
2	0,5	10122	5,67	8,00	93	—	—	—	—
	0,95	10540	6,58	8,20	95	—	—	—	—
2,5	0,5	10283	5,71	8,41	102	—	—	—	—
	0,95	10813	6,88	8,56	115	—	—	—	—

Видно, что предложенный в работе подход позволяет находить более экономичную конструкцию ХТС. Также преимуществом подхода на основе ДЭЗО в сравнении с ОЭЗО является возможность решать задачи большей размерности – при решении задачи (14) на основе ОЭЗО не удалось найти решение при $\gamma = \{2; 2,5\}$, в то время как подход на основе ДЭЗО находит решение.

Система реакторов (PP) (см рисунок 2). В реакторах протекают реакции $A \xrightarrow{k_1} B \xrightarrow{k_2} C$ и $A \xrightarrow{k_2} B \xrightarrow{k_4} C$. $C_{Ai}, C_{Bi}, V_i, T_i, i=1,2$, – концентрации компонентов A и B , объемы реакторов 1 и 2 и температуры в них соответственно. В этой задаче $C_{Ai}, C_{Bi}, i=1,2$, – переменные состояния; $V_i, i=1,2$, – конструктивные переменные, $T_i, i=1,2$, – управляющие переменные, E_1, E_2, k_{10}, k_{20} – неопределенные параметры, их номинальные значения θ^N и отклонений δ приведены в таблице 3.

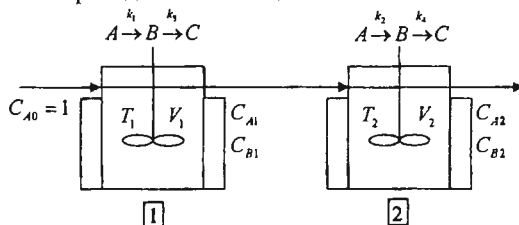


Рисунок 2 – Технологическая схема ХТС Реактор-Реактор

Таблица 3 – Характеристика области неопределенности

Параметр	E_1	E_2	k_{10}	k_{20}
θ^N	6665,9	7985,2	0,715	0,182
δ	200	240	0,0215	0,0055

ДЭЗО для проектирования оптимальной системы реакторов имеет вид:

$$\min_{V_1, V_2, z(\theta)} E_\theta[\sqrt{V_1} + \sqrt{V_2}] \quad (17)$$

$$\Pr\{C_{B2}(d, z(\theta), \theta) \geq C_{B2}^{SP}\} \geq \alpha, \quad (18)$$

$$0 \leq C_{A1}(d, z(\theta), \theta) \leq 1, \forall \theta \in T, \quad 0 \leq C_{A2}(d, z(\theta), \theta) \leq 1, \forall \theta \in T, \quad (19)$$

$$0 \leq C_{B1}(d, z(\theta), \theta) \leq 1, \forall \theta \in T, \quad 0 \leq C_{B2}(d, z(\theta), \theta) \leq 1, \forall \theta \in T,$$

$$601 \leq T_1(\theta) \leq 861, \forall \theta \in T, \quad 542 \leq T_2(\theta) \leq 801, \forall \theta \in T,$$

$$0 \leq V_1 \leq 16, 0 \leq V_2 \leq 16,$$

где $z(\theta) = \{T_1(\theta), T_2(\theta)\}$. Проектные требования системы представлены ограничением (18) (вероятностное) и (19) (жесткие). В таблице 4 приводятся результаты решения задачи проектирования ХТС PP на основе ДЭЗО и ОЭЗО.

Таблица 4 – Результаты решения задачи проектирования ХТС PP

C_{B2}^{SP}	α	ДЭЗО				ОЭЗО			
		Критерий	V_1	V_2	t , сек	Критерий	V_1	V_2	t , сек
0,5	0,9	2,832	2,006	2,006	412	2,9546	2,182	2,182	96
	0,95	2,916	2,125	2,125	364	3,0689	2,354	2,354	58
0,52	0,9	3,565	2,626	3,784	2179	4,2359	2,643	6,813	609
	0,95	4,195	2,726	6,473	1357	5,2681	3,949	10,76	445

Видно, что предложенный подход на основе ДЭЗО позволяет находить лучшее решение.

В третьей главе разработаны подходы к решению задачи проектирования оптимальных ХТС при статистически взаимно зависимых неопределенных параметрах. Было предложено два подхода для решения задачи.

Пусть параметры θ_i , $i = \overline{1, n_\theta}$, случайные, статистически взаимно зависимые переменные и имеют многомерное нормальное распределение

$$\rho(\theta) = \frac{1}{(2\pi)^{n_\theta/2} (\det \Lambda)^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (\theta - \mu)^T \Lambda^{-1} (\theta - \mu) \right\},$$

где $\mu_i = E[\theta_i]$ – вектор средних значений θ_i , Λ – ковариационная матрица

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \cdots & \rho_{1n_\theta}\sigma_1\sigma_{n_\theta} \\ \rho_{21}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \cdots & \rho_{2n_\theta}\sigma_2\sigma_{n_\theta} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n_\theta 1}\sigma_{n_\theta}\sigma_1 & \rho_{n_\theta 2}\sigma_{n_\theta}\sigma_2 & \cdots & \sigma_{n_\theta}^2 \end{pmatrix},$$

где σ_i^2 – дисперсия θ_i и ρ_{ij} – коэффициент парной корреляции параметров.

Подход 1, основанный на использовании распределения χ^2 .

Известно⁴, что, если параметры θ_i имеют многомерное нормальное распределение $N_n(\mu, \Lambda)$, то случайные переменные $y = (\theta - \mu)^T \Lambda^{-1} (\theta - \mu)$ имеют распределение χ^2 с n_θ степенями свободы. Исходя из определения функции распределения видно, что для каждой вероятности α можно найти такое значение C , что $\text{Pr}\{y \leq C\} = \alpha$. В главе показано, что ДЭЗО примет вид

$$\begin{aligned} \min_{d, z(\theta)} E_\theta[f(d, z(\theta), \theta)] \\ \max_{\theta \in T_\alpha} g_j(d, z(\theta), \theta) \leq 0, \quad j = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (20)$$

где $T_\alpha = \{\theta : (\theta - \mu)^T \Lambda^{-1} (\theta - \mu) \leq C(\alpha)\}$; зависимость $C(\alpha)$ известна и определяется с помощью таблиц распределения χ^2 .

В задаче (20) вероятностные ограничения преобразованы в детерминированные. Полученная задача является задачей полубесконечного детерминированного программирования. Для ее решения можно использовать алгоритм, вычисления верхней оценки ДЭЗО с независимыми неопределенными параметрами, предложенный в главе 2.

Подход 2, основанный на переходе к независимым случайным величинам.

Известно, что для статистически зависимых параметров θ можно подобрать такие η_i , что $\theta = E[\theta] + C\eta$, где η_i , $i = \overline{1, n_\theta}$ – независимые случайные параметры, имеющие стандартное нормальное распределение $N(0, 1)$, матрица $C = (c_{ij})$ такая, что $CC^T = \Lambda$.

⁴ Кремер Н.Ш. Теория вероятностей и математическая статистика / Н.Ш. Кремер - Юнити - Дана, 2004. - 573 с.

Проведя замену переменных, получим вид ДЭЗО с независимыми неопределенными параметрами:

$$\min_{d, z(\eta)} E_{\theta}[F(d, z(\eta), \eta)] \quad (21)$$

$$\Pr\{G_j(d, z(\eta), \eta) \leq 0\} \geq \alpha_j, \quad j = \overline{1, m},$$

где $\eta = \{\eta_i, i = \overline{1, n_{\theta}}\}$, $F(d, z(\eta), \eta) = f(d, z(\eta), E[\theta] + C\eta)$, $G_j(d, z(\eta), \eta) = g_j(d, z(\eta), E[\theta] + C\eta)$.

Задача (21) имеет вид задачи (11) и для ее решения может быть применен предложенный в главе 2 алгоритм.

Разработанные подходы были апробированы на решении задач проектирования ХТС реактор-теплообменник² и системы реакторов³. Здесь приведены результаты решения задачи проектирования системы реакторов. При решении задачи проектирования оптимальной системы использованы значения коэффициентов корреляции ρ_{ij} , предложенные авторами³, и значения элементов матрицы C , приведенные в таблице 5. В таблице 6 приводятся значения критерия задачи, полученные на основе предложенных подходов (f_1 , f_2) и полученные авторами³ (f_A).

Таблица 5 – Значения коэффициентов c_{ij} матрицы C

$i \setminus j$	1	2	3	4
1	-0,0061618	0,0162039	0,0000171	0,0099731
2	0,0000194	0,0000473	-0,0000504	0,0239999
3	-0,0020025	0,0006264	-0,0185233	0,0107115
4	0,0043413	0,0026798	-0,0019835	0,000537

Таблица 6 – Сравнение результатов решения задачи разными подходами

C_{B2}^{SP}	α	f_A	Подход 1		Подход 2	
			f_1	t , сек	f_2	t , сек
0,5	0,9	3,624	2,8261	0,24	2,738037	849
	0,95	3,671	2,8614	0,31	2,797802	266
0,52	0,9	3,899	3,5128	0,3	3,1573	126
	0,95	3,963	3,7399	0,28	3,199959	460

Из полученных результатов видно, что предлагаемые в работе подходы позволяют получать лучшее решение в сравнении с решением³. При решении задач проектирования оптимальных ХТС с зависимыми неопределенными параметрами для быстрой оценки решения рекомендуется использовать подход, основанный на распределении χ^2 . Этот подход менее точный, чем подход, основанный на замене зависимых неопределенных параметров независимыми, но позволяет решать задачу за доли секунды. Второй подход рекомендуется использовать для уточнения решения.

Четвертая глава посвящена проектированию оптимальной подсистемы реакторного узла процесса изомеризации н-пентана⁵.

⁵ Островский Г.М. Оптимизация в химической технологии / Г.М. Островский, Ю.М. Волин, Н.Н. Зиятдинов. - Казань: Фэн, 2005. - 394 с.

В главе представлена математическая модель подсистемы, сформулирована и решена задача проектирования оптимальной подсистемы реакторного узла процесса изомеризации н-пентана в виде ДЭЗО с вероятностными и жесткими ограничениями.

Технологическая схема процесса представлена на рисунке 3. Н-пентановая фракция смешивается с водородосодержащим газом (ВСГ) в смесителе C_1 , нагревается в рекуператоре T до температуры 306°C за счет теплоты реакционных газов. Затем газосырьевая смесь (ГСС) нагревается в печи Π до температуры $360 - 450^\circ\text{C}$.

Процесс изомеризации н-пентана протекает в реакторе в неподвижном слое алюмоплатинового катализатора ИП-62 ВК в среде ВСГ при общем давлении $3,6\text{ МПа}$. Контактный газ (КГ) из реактора P охлаждается в рекуператоре T и далее поступает на отделение от ВСГ и разделение продуктов реакции. Циркулирующий ВСГ частично стравливается для обеспечения требуемого парциального давления водорода. Далее к ВСГ добавляется свежий электролитический водород и после осушки ВСГ поступает на изомеризацию.

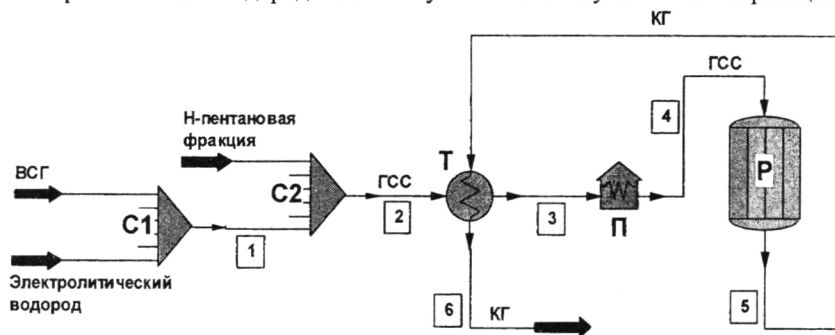


Рисунок 3 – Технологическая схема подсистемы реакторного узла процесса изомеризации н-пентана

Поисковые переменные задачи: масса загрузки реактора катализатором, $G_{\text{кат}}$, кг, – конструктивный параметр; температура на входе в реактор, $T_{\text{реак}}^{\text{in}}$, $^\circ\text{C}$, расход электролитического водорода, G_{H_2} , кг/ч, требуемый для поддержания заданной концентрации водорода в ВСГ, – управляющие параметры.

Неопределенные параметры задачи: предэкспоненциальные коэффициенты в уравнениях Аррениуса, k_{20} , кмоль/(ч·м³), k_{30} , кмоль/(ч·м³·МПа), k_{40} , кмоль/(ч·м³·МПа), и концентрация водорода в ВСГ, $c_{\text{H}_2}^{\text{ГСС}}$, %. Предполагается, что неопределенные параметры статистически независимы. В таблице 7 приведены диапазоны изменения неопределенных параметров.

Формализованная постановка задачи примет вид ДЭЗО:

$$\min_{G_{\text{кат}}, z(\theta)} E_{\theta}[C(d, z(\theta), \theta); T] \quad (22)$$

$$\Pr\{conv(d, z(\theta), \theta) \geq 0,55\} \geq 0,95, \quad (23)$$

$$\Pr\{sel(d, z(\theta), \theta) \geq 0,99\} \geq 0,95, \quad (24)$$

$$\Pr\{c_{H_2}^{\text{ГСС}} / c_{nC_5}^{\text{ГСС}} \geq 2\} \geq 0,95, \quad (25)$$

$$\begin{aligned} 0 \leq G_{H_2}(\theta) \leq 100, \quad \forall \theta \in T, & \quad 350 \leq T_{\text{реакт}}^{\text{in}}(\theta) \leq 450, \quad \forall \theta \in T, \\ conv(d, z(\theta), \theta) \geq 0,52, \quad \forall \theta \in T, & \quad sel(d, z(\theta), \theta) \geq 0,97, \quad \forall \theta \in T, \\ 0,001D_{\text{реакт}} \leq s_{\text{реакт}}(d, z(\theta), \theta) \leq 0,1D_{\text{реакт}} + v_{\text{корр}} \cdot 80000, \quad \forall \theta \in T, \end{aligned}$$

где $z(\theta) = \{G_{H_2}(\theta); T_{\text{реакт}}^{\text{in}}(\theta)\}$, критерий $C(d, z(\theta), \theta)$ имеет вид суммарных затрат, включающих приведенные капитальные и эксплуатационные затраты:

$$\begin{aligned} C(d, z(\theta), \theta) = & (C_{\text{кат}} G_{\text{кат}} + C_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} V_{\text{ст}}(d, z(\theta), \theta)) / 80000 + \\ & + C_{\text{H}_2} G_{\text{H}_2}(d, z(\theta), \theta) + C_{\text{H}_2} G_{H_2}(d, z(\theta), \theta), \end{aligned} \quad (26)$$

где $C_{\text{кат}}$ – цена катализатора, руб / кг, $G_{\text{кат}}$ – масса катализатора, кг, $C_{\text{ст}}$ – цена стали, руб / кг, $\rho_{\text{ст}}$ – необходимая для постройки реактора масса стали, кг, C_{H_2} – цена электролитического водорода, руб / кг, G_{H_2} – расход водорода, кг / ч, $G_{\text{тп}}$ – расход топливного газа в печи, кг / ч, $C_{\text{тп}}$ – цена топливного газа, руб / кг; $c_{nC_5}^{\text{ГСС}}$ – концентрация н-пентана в ГСС; $D_{\text{реакт}}$ – внутренний диаметр реактора, $s_{\text{реакт}}$ – толщина стенки реактора, $v_{\text{корр}}$ – скорость коррозии стали; $conv$ – конверсия, sel – селективность.

Таблица 7 – Диапазоны изменения неопределенных параметров

Параметр	θ_i^L	θ_i^N	θ_i^U
k_{20} , кмоль/(ч·м ³)	$1,9206 \cdot 10^{13}$	$1,98 \cdot 10^{13}$	$2,0394 \cdot 10^{13}$
k_{30} , кмоль/(ч·м ³ ·МПа)	$1,5132 \cdot 10^{17}$	$1,56 \cdot 10^{17}$	$1,6068 \cdot 10^{17}$
k_{40} , кмоль/(ч·м ³ ·МПа)	$4,5493 \cdot 10^{17}$	$4,69 \cdot 10^{17}$	$4,8307 \cdot 10^{17}$
c_{H_2} , % вес	90	92,5	95

Задача (22) проектирования оптимальной подсистемы реакторного узла процесса изомеризации н-пентана на основе ДЭЗО была решена с применением предложенного подхода. Результаты решения задачи (22) приведены в таблице 8.

Для сравнения в таблице 8 приведены результаты, полученные на основе использования отраслевых коэффициентов. В этом подходе сначала решается задача номинальной оптимизации, затем оптимальные значения конструктивных параметров домножают на соответствующий эмпирический коэффициент запаса $\gamma_{\text{зап}}$ (для химической промышленности обычно принимают $\gamma_{\text{зап}} = 1,25$).

Из таблицы 8 видно, что учет неопределенности с помощью ДЭЗО позволил сократить затраты на 14,24%. В таблице C_3 – значение критерия (26), полученное при использовании коэффициента запаса $\gamma_{\text{зап}}$, C_d – полученное на основе предложенного подхода на основе ДЭЗО.

Таблица 8 – Результаты решения задачи (22)

Подход	Проектирование на основе отраслевого коэффициента запаса $\gamma_{\text{зап}} = 1,25$	Проектирование на основе ДЭЗО
Загрузка кат., $G_{\text{кат}}$, кг	15885	13507
Высота реактора, h , м	11,3	10,7
Диаметр реактора, d , м	1,9	1,8
Толщина стенок, s , мм	28	27
Приведенные затраты, руб/год	17 070 863	14 640 085
$(C_3 - C_d) / C_3$, %		14,24
Оценка экономии за период экспл., руб.	–	24 307 780

Таким образом, экономия за весь период эксплуатации ХТС составляет порядка 24,31 млн руб. Решение задачи заняло около трех минут.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложены новые эффективные подходы, преобразующие двухэтапную задачу оптимизации с вероятностными ограничениями и нормально распределенными неопределенными параметрами в задачу детерминированной полубесконечной оптимизации, которая позволяет определить верхнюю оценку критерия задачи:

- а. подход и алгоритмы, используемые при статистически независимых неопределенных параметрах, основан на аппроксимации областей выполнения ограничений многомерными прямоугольниками и зависимости управлений от неопределенных параметров кусочно-линейными функциями;
- б. подходы, используемые при статистически зависимых неопределенных параметрах, основаны на распределении χ^2 или замене зависимых неопределенных параметров независимыми и опираются на предыдущие подход и алгоритмы.

2. Разработан эффективный алгоритм уточнения верхней оценки критерия двухэтапной задачи оптимизации, согласующая уточнение аппроксимаций зависимости управлений от неопределенных параметров, областей выполнения ограничений и математического ожидания критерия задачи.

3. Предложенные подходы позволяют избежать процедуры вычисления многомерных интегралов в критерии и ограничениях двухэтапной задачи оптимизации на каждой итерации ее решения.

4. Предложенные подходы решения задач проектирования оптимальных ХТС при статистической зависимости неопределенных параметров могут использоваться для решения задачи в постановках двухэтапной и одноэтапной задач оптимизации с вероятностными и жесткими ограничениями.

5. Подход, предложенный для решения задач проектирования оптимальных ХТС с зависимыми неопределенными параметрами и основанный на распределении χ^2 , рекомендуется использовать для быстрого получения оценки решения. Для уточнения решения рекомендуется использовать подход, основанный на переходе к независимым случайным величинам.

6. На основе разработанных алгоритмов создан программный комплекс решения задач проектирования оптимальных ХТС в постановке двухэтапных задач оптимизации с вероятностными ограничениями, эффективность которого показана на решении ряда задач проектирования ХТС, что подтверждается письмами о намерении внедрения программного комплекса в проектную деятельность ООО "Инженерно-внедренческий центр "Инжехим" (г. Казань) и ООО "Оптимальные нефтехимические технологии" (г. Казань).
7. Решена задача проектирования оптимальной подсистемы реакторного узла процесса изомеризации *n*-пентана. Показана эффективность предложенного подхода в сравнении с подходом, использующим отраслевые коэффициенты.
8. Применение предложенных подходов и алгоритмов решения задачи проектирования оптимальных ХТС не ограничивается химической технологией и может быть распространено на другие отрасли.

Публикации по теме работы

Публикации в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Лаптева Т.В. Двухэтапные задачи оптимизации химико-технологических процессов / Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов, Г.М. Островский, И.В. Зайцев // Доклады Академии наук, 2010. – Т. 435, № 4. – С. 497-500.
2. Зиятдинов Н.Н. Оптимальное проектирование системы реакторов на основе двухэтапной задачи оптимизации / Н.Н. Зиятдинов, Г.М. Островский, И.В. Зайцев и др. // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2011. – Т. 14, № 10 – С. 223-231.
3. Ostrovsky G.M. Two-stage optimization problem with chance constraints / G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, I.V. Zaitsev // Chemical Engineering Science. – 2011. – № 66. – P. 3815-3828.
4. Ostrovsky G.M. Optimization of chemical processes with dependent uncertain parameters / G.M. Ostrovsky, N.N. Ziyatdinov, T.V. Lapteva, I.V. Zaitsev // Chemical Engineering Science. – 2012. – № 83. – P. 119-127.
5. Зиятдинов Н.Н. Эффективность аппроксимации управлений в двухэтапной задаче проектирования оптимальных ХТС / Н.Н. Зиятдинов, И.В. Зайцев, Т.В. Лаптева // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2012. – Т. 15, № 16 – С. 247-250.
6. Зайцев И.В. Алгоритм решения задачи двухэтапного проектирования оптимальных химико-технологических систем с вероятностными ограничениями с учетом неопределенности / И.В. Зайцев, Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2013. – Т. 16, № 1 – С. 251-256.
7. Лаптева Т.В. Решение задачи полубесконечного программирования в задачах проектирования оптимальных ХТС / Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов, И.В. Зайцев // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2012. – Т. 15, № 24 – С. 139-146.
8. Зайцев И.В. Проектирование оптимальной подсистемы реакторного узла процесса изомеризации *n*-пентана путем решения двухэтапной задачи оптимизации / И.В. Зайцев, Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2013. – Т. 16, № 17 – С. 204-208.

Публикации в сборниках трудов научных конференций:

9. Зайцев И.В. Двухэтапная задача оптимизации с мягкими ограничениями / И.В.Зайцев, Г.М. Островский, Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIII Междунар. науч. конф. – Саратов: Сарат. гос. Техн. Ун-т, 2010. – Т.2. – С. 8-10.
10. Лаптева Т.В. Проектирование химико-технологических систем на основе двухэтапной задачи с мягкими ограничениями / Т.В. Лаптева, Н.Н. Зиятдинов, И.В. Зайцев, Г.М. Островский // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXIV Междунар. науч. конф. – Киев: Национ. технич. ун-т Украины "КПИ", 2011. – Т. 2. – С. 6-8.
11. Зайцев И.В. Мягкая двухэтапная задача оптимизации химико-технологических систем в условиях неопределенности / И.В. Зайцев, Н.Н. Зиятдинов // Сборник Тезисов I Всероссийской Интернет-конференции "Грани науки 2012". – Казань, 2012 г. – С. 233-234.
12. Зайцев И.В. Одноэтапная задача вероятностной оптимизации для случая зависимых неопределенных параметров / И.В. Зайцев, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXV Междунар. науч. конф. – Харьков, 2012. – Т.2. – С. 16-17.
13. Зайцев И.В. Алгоритм решения задачи двухэтапного проектирования технических систем с учетом неопределенности / И.В. Зайцев, Т.В. Лаптева, Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов // Математические методы в технике и технологиях: сб. трудов XXVI Междунар. науч. конф. – Новгород, 2013. – Т.2. – С. 9-13.

Патенты и авторские свидетельства

14. Зайцев И.В. Программный комплекс решения задач двухэтапной оптимизации с вероятностными ограничениями / И.В. Зайцев, Г.М. Островский, Н.Н. Зиятдинов, Т.В. Лаптева // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.: – № 2013660150 от 25.10.2013.

Подписано в печать 14.11.2013. Форм. бум. 60х84 1/16.

Печ. л. 1,25. Тираж 150. Заказ № 1411/1.

Отпечатано с готового оригинала – макета
в типографии «Вестфалика» (ИП Колесов В.Н.)

420111, г. Казань, ул. Московская, 22. Тел.: 292-98-92

e-mail: westfalika@inbox.ru

10^2